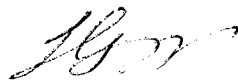


Н 561

Контрольный  
На правах рукописи



Нестеров Александр Сергеевич

**ДРОССЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
С УЛУЧШЕННЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ  
И ПОВЫШЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
2009

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Гафиятуллин Рафаиз Хазеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Воронин С.Г.;  
доктор технических наук, профессор  
Карандаев А.С.

Ведущая организация – Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), г. Новочеркасск.

Защита состоится 26 февраля 2009 г., в 10<sup>00</sup> часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, диссертационный совет Д212.298.05, тел./факс 8 (351) 267-96-90, e-mail: [nas\\_2004@mail.ru](mailto:nas_2004@mail.ru), [allnest@rambler.ru](mailto:allnest@rambler.ru).

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Усынин Ю.С.



**Актуальность работы** обусловлена необходимостью создания асинхронных электроприводов, в частности, для крановых механизмов, с включением в роторную цепь дросселя с силовым вентильным преобразователем и системой управления, обладающих улучшенными массогабаритными показателями в сочетании с повышенными энергетическими характеристиками и производительностью.

В направлении развития электроприводов данного класса, получивших название «дроссельный асинхронный электропривод» (ДЭП), работает ряд организаций, таких как: ООО «Горнозаводское объединение» (г. Челябинск), Липецкий металлургический завод, и другие. ООО «Горнозаводское объединение» за период с 1996–2008 г. установило по России и странам ближнего зарубежья более 7000 ДЭП. В настоящее время это предприятие работает с 22 крановыми заводами по России и странам ближнего зарубежья (Кировским заводом железнодорожных кранов, Нязепетровским заводом башенных кранов, Харьковским заводом ПТО, заводом «НКМЗ» г. Новокраматорск, Павлодарским крановым заводом, Ташкентским заводом «Подъемник» и др.).

Интерес к ДЭП, несмотря на потери энергии скольжения, не снижается, так как они позволяют получить низкие скорости при выборе слабины канатов, низкие посадочные скорости и сверхнизкие скорости для точной остановки крановых механизмов. Кроме того, ДЭП по сравнению с частотно-регулируемыми электроприводами имеют более широкий температурный диапазон эксплуатации, менее критичны к параметрам агрессивности окружающей среды и, в силу простоты своей технической реализации, не требуют высокого уровня квалификации обслуживающего персонала.

Большой вклад в исследование и развитие ДЭП внесли ученые МЭИ, МГТУ им. Носова, кафедры электропривода Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) и др.

Несмотря на большой объем проведенных работ в области ДЭП, вопросы конструирования электроприводов, включающих в себя дроссель и обладающих улучшенными массогабаритными и энергетическими показателями, а также вопросы расширения функциональных возможностей ДЭП требуют более внимательного рассмотрения.

**Целью работы** является улучшение массогабаритных и энергетических показателей ДЭП и повышение его производительности при работе в установленных режимах.

Для достижения поставленных целей решались следующие **задачи**:

- создание математической и компьютерной моделей для исследования тепловых процессов, протекающих в дросселе при работе в составе ДЭП;
- создание ДЭП с улучшенными массогабаритными показателями при заданных электромагнитных и тепловых характеристиках, диктуемых техническими требованиями к электроприводу;
- разработка алгоритма, математической и компьютерной моделей для исследования режимов ограничения токов статора и ротора двигателя ДЭП при

его переходе с дроссельной механической характеристики на естественную механическую характеристику электродвигателя;

– создание регулятора ограничения токов статора и ротора ДЭП при его выходе на естественную двигательную характеристику для обеспечения повышенной производительности электропривода в целом.

**Методы исследования.** Поставленные задачи в диссертационной работе решаются с использованием теории электропривода, автоматического управления, индукционного нагрева, методов математического моделирования и анализа.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** подтверждается корректным использованием методов расчета статических и динамических процессов в математических и компьютерных моделях при общепринятых допущениях, удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных результатов, а также результатами промышленного внедрения и эксплуатации дроссельных электроприводов с улучшенными массогабаритными и энергетическими показателями и повышенной производительностью.

#### **Научная новизна работы**

1. Впервые для дроссельных электроприводов разработана методика расчета тепловых процессов в дросселе, на основе которой созданы математическая и компьютерная модели, позволяющие улучшить массогабаритные показатели электроприводов данного класса.

2. Разработаны теоретические основы расчета допустимой мощности дросселя с учетом требований, предъявляемых к ДЭП.

3. Впервые для ДЭП разработаны математическая и компьютерная модели расчета улучшенных массогабаритных и энергетических показателей дросселей с учетом заданных электромагнитных и тепловых характеристик, диктуемых техническими требованиями к электроприводу

4. Предложена структура и разработана математическая и компьютерная модели нового пускорегулирующего устройства, обеспечивающего повышение производительности механизма и снижение потерь в ДЭП при его работе в установившихся режимах.

#### **Практическая ценность работы** заключается в следующем:

1. Разработана программа расчета тепловых характеристик дросселя при работе в составе электропривода с учетом электромагнитных и массогабаритных показателей дросселей, а также проведены экспериментальные исследования тепловых характеристик серийных дросселей;

2. Созданы программы расчета электромагнитных и массогабаритных показателей и проверочного расчета допустимой мощности дросселей для работы в составе асинхронного электропривода, обеспечивающие улучшение технических характеристик электроприводов данного класса (Патент РФ № 2300169);

3. По результатам проведенных исследований получены рекомендации по улучшению массогабаритных и электромагнитных показателей дросселей. В результате созданы каталоги серийных дросселей, выпуск которых осуществляется ООО «Горнозаводское объединение»;

4. Созданы и внедрены на производстве ДЭП с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями, обладающие повышенной производительностью (Патенты РФ № 55229 и № 2311725).

#### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Математическая модель и программа расчета электромеханических характеристик ДЭП с пускорегулирующим устройством в роторной цепи.

2. Метод и программа расчета дросселей для ДЭП с улучшенными электромагнитными и массогабаритными показателями.

3. Методика, математическая и компьютерная модели, а также программа расчета тепловых характеристик дросселя в составе асинхронного электропривода.

4. Структура пускорегулирующего устройства, повышающего производительность ДЭП.

**Апробация работы.** Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- международной конференции «Проблемы производства и безопасной эксплуатации подъемных сооружений в Украине и России» (Украина, Одесса, 2005 г.);

- 13-й и 14-й международных научно-технических конференциях «Электроприводы переменного тока» (Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2005, 2007);

- Всероссийской конференции-конкурсе инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и ресурсосбережение» (Томск, ТПИ, 2006 г.);

- международной одиннадцатой конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», МКЭЭЭ-2006 (ICEEE-2006), (Крым, Алушта, 2006 г.);

- научно-практической конференции «Современные методы и средства автоматического управления техническими объектами» (Челябинск, 2006 г.);

- международной научно-практической конференции «Эффективность систем энергосбережения», (Челябинск, 2007 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ в периодических изданиях, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК, сборниках научных трудов и сборниках тезисов докладов научно-технических конференций. На оригинальные технические решения получены 4 патента РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 138 страниц, заключения, списка литературы из 176 наименований, 2 приложений. Общий объем диссертации 167 страниц, включая 64 рисунка и 36 таблиц.

Автор выражает благодарность научным консультантам Борису Алекса́ндру Михайловичу и Драчеву Генна́дию Ива́новичу за помощь при завершении работы над диссертацией.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, приводятся основные положения и результаты, выносимые на защиту, отмечается их новизна и практическая значимость. Приводятся сведения о внедрении результатов работы и публикациях.

**В первой главе** проведен обзор основных схем, применяемых для регулирования координат электропривода переменного тока с асинхронным двигателем с фазным ротором (АДФР). Рассмотрен дроссель как средство формирования требуемых электромеханических свойств асинхронного электропривода.

Проведен обзор современного состояния и перспектив развития ДЭП. Показана необходимость создания методов расчета мощности, массогабаритных и электромагнитных параметров дросселей, используемых в ДЭП, а также разработки и технической реализации алгоритмов повышения производительности ДЭП.

Создание таких методов и алгоритмов невозможно без дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Во второй главе** рассмотрены физические основы работы дросселя в переменном по частоте и амплитуде электромагнитном поле. Произведена оценка влияния на величину сопротивления дросселя различных факторов.

За основу при расчете сопротивления магнитной цепи дросселя было принято следующее выражение:

$$\underline{Z}_m = 0,86 \cdot \frac{l}{\pi \cdot D} \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \gamma}{\mu \cdot \mu_0}} \cdot e^{j59^\circ}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина сердечника дросселя,  $D$  – внешний диаметр сердечника дросселя,  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость материала трубы,  $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость на поверхности магнитопровода дросселя, определяемая по кривой намагничивания;

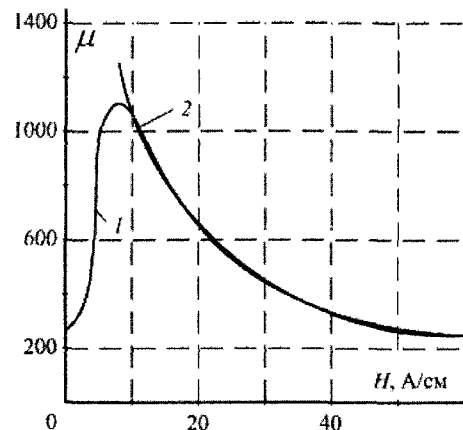


Рис. 1. Магнитная характеристика стали: экспериментальная 1 и расчетная 2

Рассмотрены магнитные характеристики сталей, используемых при изготовлении сердечников (рис. 1). Для удобства работы с данными была проведена аппроксимация зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от напряженности магнитного поля  $H$  выражением

$$\mu = \frac{1}{a + b \cdot H}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – экспериментальные коэффициенты.

На основе выражений (1) и (2) и экспериментальных исследований получено выражение для расчета полного электрического сопротивления дросселя:

$$Z_{ДР} = \frac{3,62 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot w^2 \cdot D}{l \cdot \sqrt{f \cdot (a + \frac{b \cdot I_2 \cdot w}{l})}} \quad (3)$$

Здесь  $w$  – число витков обмотки дросселя,  $f$  – частота тока, протекающего по обмотке дросселя.

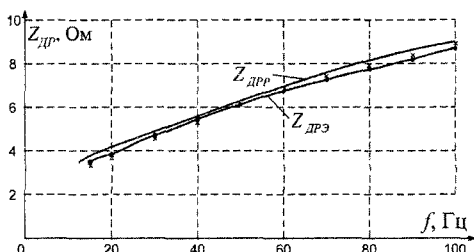


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости сопротивления дросселя  $Z_{ДР}$  от частоты  $f$

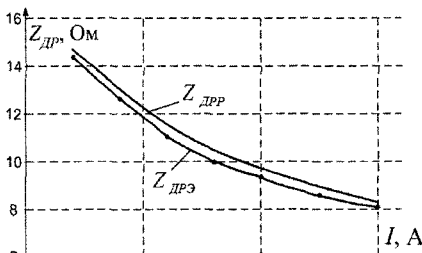


Рис. 3. Зависимость сопротивления  $Z_{ДР}$  от тока  $I$

25–35 %, а замена медной обмотки алюминиевой дает увеличение сопротивления на 5–10 %. Полученные результаты в дальнейшем были учтены при изготовлении серийных дросселей.

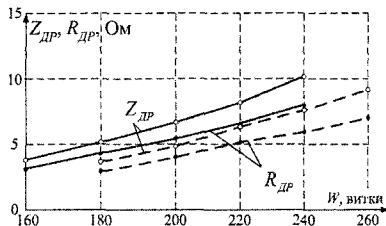


Рис. 4. Влияние разреза сердечника на величину полного  $Z_{ДР}$  и активного  $R_{ДР}$  сопротивлений (сплошная линия – разрезанный сердечник дросселя, пунктирная – сплошной сердечник)

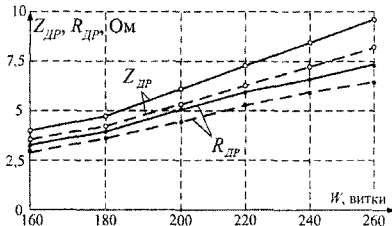


Рис. 5. Влияние материала обмотки на величину полного  $Z_{ДР}$  и активного  $R_{ДР}$  сопротивлений (сплошная линия – алюминиевая обмотка, пунктирная – медная)

Изучение влияния нагрева показало, что нагрев дросселя увеличивает его сопротивление на 20–30 %, кроме того, определено, что наибольшее влияние

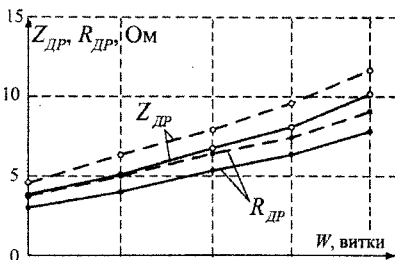


Рис. 6. Влияние температуры дросселя на величину полного  $Z_{ДР}$  и активного  $R_{ДР}$  сопротивлений (сплошная линия — «холодный» дроссель, пунктир — «горячий»)

оказывается на дроссели с цельным сердечником и медной обмоткой, а наименьшее — с разрезанным сердечником и алюминиевой обмоткой. Это необходимо учитывать при выборе температурного режима дросселя.

В третьей главе рассмотрены тепловые процессы, протекающие в дросселе при его работе в составе ДЭП.

При разработке математической модели тепловых процессов в дросселе была использована двухмассовая тепловая модель, учитывающая следующие допущения:

1) сердечник и обмотка дросселя — сплошные однородные тела, имеющие одинаковую температуру во всех своих точках. Теплоемкости сердечника  $C_C$  и обмотки  $C_{ОБМ}$ , описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} C_C &= C_{C_0} \cdot V_C \cdot v_C, \\ C_C &= C_{ОБМ_0} \cdot V_{ОБМ} \cdot v_{ОБМ}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $C_{C_0}$ ,  $C_{ОБМ_0}$  — удельная теплоемкость соответственно материала сердечника и обмотки, Дж/кг·°С.

2) температура окружающей среды — постоянна и не зависит от количества теплоты, отдаваемой дросселем;

3) при теплопередаче в окружающий воздух производится учет только теплопередачи за счет конвекции и не учитывается излучение;

4) тепловые потери, теплоемкость дросселя и коэффициенты теплоотдачи не зависят от его температуры;

5) соединительные конструкции дросселя не учитываются при расчете;

6) температура сердечника всегда больше температуры обмотки дросселя;

Определены основные пути распределения тепла в дросселе:

1) нагрев сердечника за счет вихревых токов и явления гистерезиса;

2) нагрев обмотки дросселя за счет электрических потерь в ней;

3) передача теплоты от сердечника в окружающий воздух;

4) нагрев обмотки со стороны сердечника посредством теплопередачи;

5) передача теплоты от обмотки в окружающий воздух.

Разработаны физические модели дросселя (рис. 7).

На основе системы уравнений

$$\begin{cases} P_{ИР} = P_C + P_{ОБМ} \\ P_C = C_C \cdot \frac{d\tau_C}{dt} + A_C \cdot \tau_C + P_{C-ОБМ} \\ P_{C-ОБМ} = A_{C-ОБМ} \cdot \tau_{C-ОБМ} \\ P_{ОБМ} + P_{C-ОБМ} = C_{ОБМ} \cdot \frac{d\tau_{ОБМ}}{dt} + A_{ОБМ} \cdot \tau_{ОБМ} \end{cases}, \quad (5)$$



где  $P_C$ ,  $P_{OБМ}$  и  $P_{C-OБМ}$  – мощность потерь в стали сердечника, мощность потерь в обмотке и мощность, затрачиваемая на нагрев обмотки со стороны сердечника,  $C_C$  и  $C_{OБМ}$  – теплоемкости сердечника и обмотки,  $A_C$ ,  $A_{OБМ}$  и  $A_{C-OБМ}$  – теплоотдачи сердечника и обмотки в окружающую среду и от сердечника к обмотке,  $\tau_C = T_C - T_{OC}$ ,  $\tau_{OБМ} = T_{OБМ} - T_{OC}$  и  $\tau_{C-OБМ} = \tau_C - \tau_{OБМ}$  – перегрев сердечника относительно окружающей среды, обмотки относительно окружающей среды и сердечника относительно обмотки, составлено уравнение теплового баланса:

$$P_{ИР} = C_C \cdot \frac{d\tau_C}{dt} + A_C \cdot \tau_C + C_{OБМ} \cdot \frac{d\tau_{OБМ}}{dt} + A_{OБМ} \cdot \tau_{OБМ} \quad (6)$$

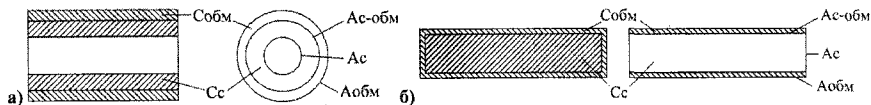


Рис. 7. Физическая двухмассовая тепловая модель дросселя: а) с трубчатым сердечником; б) с пластинчатым сердечником

На основе системы уравнений (5) составлена энергетическая диаграмма дросселя и структурная схема математической модели тепловых процессов, протекающих в дросселе (рис. 8).

Расчет теплоотдачи  $A$  обмотки и сердечника ведется по следующим формулам:

$$A = \alpha \cdot S, \quad \alpha_{12П} = \frac{\epsilon_K \cdot \lambda_f}{\delta}, \quad \alpha_{12Ц} = \frac{2 \cdot \epsilon_K \cdot \lambda_f}{d_1 \cdot \ln(d_2/d_1)} \quad (7)$$

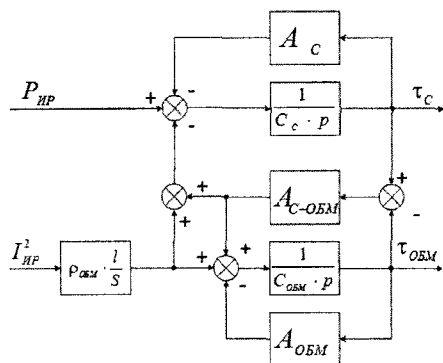


Рис. 8. Структурная схема модели тепловых процессов в дросселе

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $S$  – площадь поверхности нагретого тела, с которой осуществляется теплопередача,  $\epsilon_K = \lambda_{ЭК}/\lambda_f = f(Gr \cdot Pr)_f$  – коэффициент конвекции,  $\delta$  – толщина прослойки,  $\lambda_{ЭК}$  – эквивалентная теплопроводность,  $\lambda_f$  – теплопроводность охлаждающей среды в прослойке при среднеарифметической температуре стенок.

На основе математического описания и структурной схемы в программном пакете MatLab 6.5 + Simulink 4.5 была разработана модель, описывающая тепловые процессы, протекающие в дросселе.

Разработанная модель позволяет рассчитывать теплоемкости, коэффициенты теплоотдачи, значения температуры обмотки и сердечника.

В ходе экспериментальных исследований проведена проверка адекватности разработанной математической модели реальному объекту. Проведены тепловые испытания экспериментального макета дросселя, а также шести типоминералов дросселей, выпускаемых ООО «Горнозаводское объединение». Погрешность расчетов составляет не более 5–10 % (рис. 9).

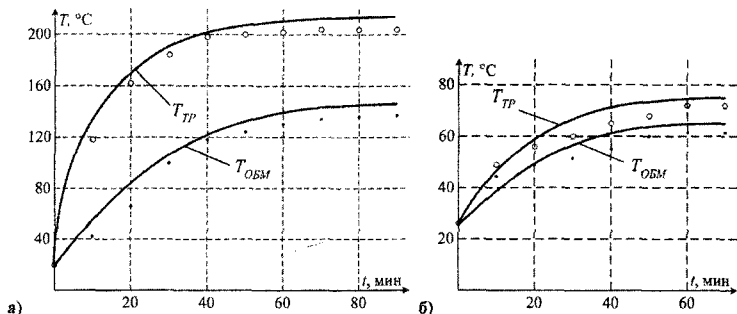


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования тепловых процессов, протекающих в дросселях: а) ДПД-4; б) макетный дроссель

В ходе экспериментов и моделирования на ПЭВМ получены следующие результаты:

- температура сердечника превосходит температуру обмотки в среднем 1,5–1,7 раза;
- воздушный промежуток между обмоткой и сердечником ведет к увеличению разницы между температурами обмотки и сердечника;

- при нагреве происходит увеличение полного и активного сопротивления дросселя. Этот эффект негативно сказывается на величине пускового момента и тока электродвигателя, уменьшая их значения.

В четвертой главе рассмотрены вопросы выбора серийного дросселя и методика расчета улучшенных показателей дросселя.

Выбор серийного дросселя предлагается производить по составленному в ходе работы каталогу. Проведенные исследования показали, что погрешность составляет 10–15 %.

При отсутствии в каталоге дросселя с требуемыми параметрами предлагается производить расчет дросселя, обладающего наилучшими массогабаритными и электрическими показателями.

В качестве основных критериев улучшения параметров дросселей используются следующие характеристики:

- пусковой момент, необходимый для обеспечения требуемых показателей пускотормозных режимов (времени пуска, ускорения и т.д.);

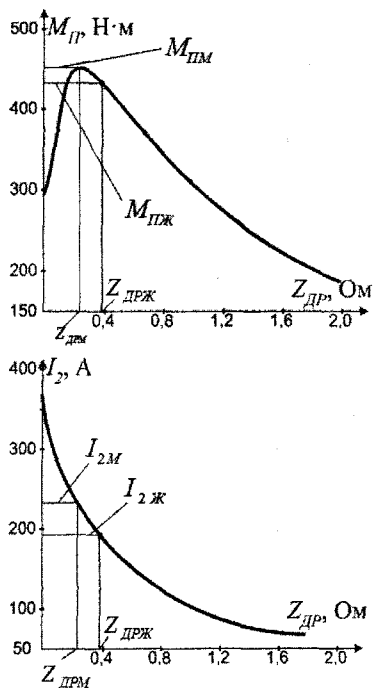


Рис. 10. Зависимости  $M_{П} = f(Z_{ДР})$  и  $I_{2П} = f(Z_{ДР})$  для расчета оптимального сопротивления дросселя для электродвигателя 4МТН200L6

- минимальные значения токов статора и ротора, обеспечивающие снижение нагрева двигателя в пускотормозных режимах;
- минимальные габаритные размеры и минимальная масса дросселя и ДЭП в целом.

Расчет параметров дросселя предлагается проводить в следующей последовательности:

1. Расчет величины сопротивления дросселя  $Z_{ДРЖ}$ , обеспечивающего требуемый пусковой момент. Для этого построены на основе известных выражений зависимости  $M_{П} = f(Z_{ДР})$  и  $I_{2П} = f(Z_{ДР})$ . Определяется величина сопротивления дросселя  $Z_{ДРЖ}$ , необходимого для создания требуемого пускового момента  $M_{ПЖ}$  и ограничения пускового тока;

2. Расчет пусковых значений токов статора и ротора при требуемом пусковом моменте  $M_{ПЖ}$ ;

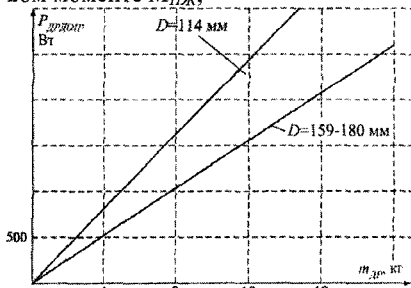


Рис. 11. Зависимости  $P_{доп} = f(m_{др})$  для сердечников различного диаметра

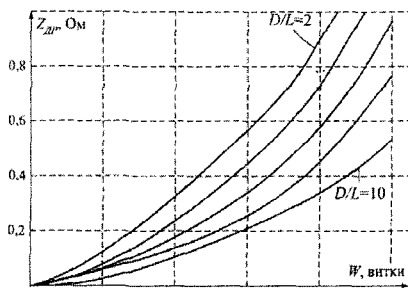


Рис. 12. Зависимости  $Z_{др} = f(W)$  при фиксированном токе и соотношениях  $L/D$

3. Расчет тепловых характеристик проектируемого дросселя.

На основе разработанной математической модели определена зависимость максимальной рассеиваемой дросселем мощности от массы его сердечника  $P_{доп} = f(m_{др})$  (рис. 11).

4. Проектирование магнитной системы дросселя (расчет габаритных размеров проектируемого дросселя).

Пользуясь выражением (3) были построены кривые (рис. 12), описывающие зависимость сопротивления дросселя от числа витков его обмотки при постоянном значении тока, протекающего по ней и равном пусковому, и постоянных значениях  $L/D$ .

Из полученных графиков для каждого диаметра сердечника и конкретной величины сопротивления дросселя определяется число витков обмотки, габаритные размеры и масса дросселя, а также рассчитываются конструктивные коэффициенты  $K1$  и  $K2$  и определяется длина обмоточного провода и активное сопротивление обмотки.

С помощью графиков на рис. 11 определяется допустимая мощность дросселя.

5. Расчет сечения обмоточного провода проектируемого дросселя.

6. Расчет механических и электромеханических характеристик (рис. 13).

Расчет характеристик ведется по Т-образной схеме замещения электродвигателя, учитывающей сопротивление дросселя  $Z_{ДР}$ :

$$Z_{ДР} = \frac{K1 \cdot \sqrt{f} \cdot w^2}{\sqrt{1 + K2 \cdot I_2 \cdot w}} \cdot e^{j40^\circ} \quad (8)$$

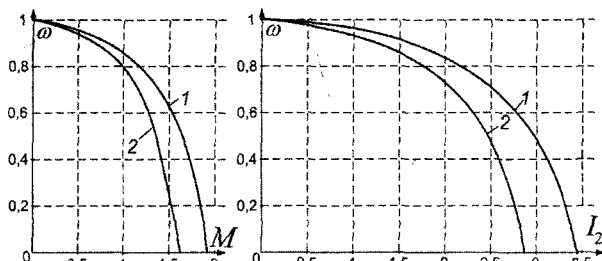


Рис. 13. Механические и электромеханические характеристики ДЭП

Из рис. 13 видно, что величина пускового момента отличается от заданного не более чем на 10 %.

7. Расчет энергетических показателей проектируемых дросселей и ДЭП в целом. Поверочный расчет дросселя.

Дроссель входит в состав электропривода, работающего без четкого циклического режима работы. Поэтому первоначально необходимо провести поверочный расчет электродвигателя. Основываясь на рекомендациях по продолжительности циклов работы, числу циклов в час и продолжительности работы при проведении поверочного расчета выполняются следующие действия:

а) рассчитывается предельная величина энергии, выделяющейся в двигателе за 1 час работы с номинальной нагрузкой при ПВ=40%:

$$\Delta W_{40\%} = 1440 \cdot (3 \cdot I_{1H40\%}^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_{2H40\%}^2 \cdot r_2), \quad (9)$$

где 1440 с – длительность работы за 1 час при ПВ=40%;

б) выбирается усредненный режим работы:

- количество циклов за час равно 30;
- продолжительность цикла принимается равной 120 с, время работы при ПВ=40 % равно 48 с.
- число включений равно 9, продолжительность включения – 5,3 с (рис. 14).

На участке I происходит выбор слабины канатов (в толчковом режиме), затем идет разгон двигателя (участок II), установившийся режим (участок III) и торможение протировключением (участок IV);

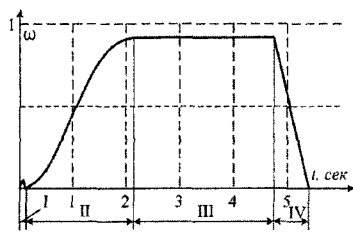


Рис. 14. Процесс работы в течение одного включения с выбором слабины каната при  $t_{вкл}=5,3$  с

в) Рассчитываются потери энергии за

время  $t_{вкл}$  для двигателя и дросселя:

$$\Delta W_{ДВ} = \Delta W_1 + \Delta W_2 = \Delta P_{ДВ} \cdot t_{вкл}, \quad (10)$$

$$\Delta W_{ДР} = \Delta P_{ДР} \cdot t_{вкл},$$

где  $\Delta W_{ДВ}$ ,  $\Delta W_{ДР}$  – энергия потерь за принятый цикл в двигателе и дросселе соответственно,  $\Delta W_1$ ,  $\Delta W_2$  – энергия потерь за принятый цикл в статоре и роторе двигателя,  $\Delta P_{ДВ}$  и  $\Delta P_{ДР}$  – потери в двигателе и

дресселе соответственно,  $t_{вкл}$  – время одного включения;

г) определяется число включений  $h$ , время цикла  $t_{ц}$  и продолжительность включения ПВ;

д) рассчитываются значения токов статора и ротора при рассчитанной ПВ;

е) при ПВ, отличной от 40 % снижается величина допустимого статического момента. По формуле (11) определяется, на сколько уменьшается допустимая мощность на валу:

$$\Delta = \frac{|P_{H40\%} - P_{BP}|}{P_{H40\%}} = \frac{|M_{H40\%} \cdot \omega_{H40\%} - M_P \cdot \omega_P|}{M_{H40\%} \cdot \omega_{H40\%}}; \quad (11)$$

ж) рассчитывается энергия, выделяющая в течение 1 часа и допустимая мощность дросселя:

$$\Delta W_{ДР}^{1час} = h \cdot \Delta W_{ДР}, \quad P_{доп} = \frac{\Delta W_{ДР}^{1час}}{3600}. \quad (12)$$

С помощью математической модели тепловых процессов рассчитывается нагрев сердечника и обмотки. Если нагрев сердечника превышает 250 °С, а нагрев обмотки – 180 °С соответственно, то изменяется масса дросселя и расчет повторяется. В соответствии с выражением (12) определяется допустимая мощность дросселя  $P_{доп}$ . С помощью графиков  $P_{доп} = f(m_{др})$  заново определяется масса дросселя, его конструктивные параметры. Заново проводится расчет механических и электромеханических характеристик привода, а также поверочный расчет дросселя. Расчет должен проводиться до достижения заданных параметров дросселя и удовлетворения требований по нагреву.

Если же нагрев сердечника не превышает 250 °С, а нагрев обмотки – 180 °С соответственно, то расчет считается окончанным. Результатом расчета параметров дросселя должны быть конструктивные параметры дросселя, а также величина снижения допустимой мощности электродвигателя при ПВ=40%, т.е. величина снижения статической нагрузки.

#### 8. Конструктивная проработка проектируемого дросселя

На последнем этапе детально прорабатывается конструкция дросселя исходя из механической прочности и других критериев.

На рис. 15 приведен алгоритм выполнения расчета.

**Пятая глава** посвящена разработке, математическому описанию и экспериментальному исследованию пускорегулирующего устройства, позволяющего без существенных бросков момента и токов статора и ротора вывести ДЭП с дроссельной механической характеристики на механическую характеристику, близкую к естественной двигательной. Это благоприятно сказывается на работе механизмов, технологический процесс которых включает в себя перемещение на большие расстояния с максимально возможной скоростью (грейферные краны, бурильные установки и др.).

Разработанное устройство РСТ05-В, включает в себя систему управления СУ и блок БТ соединенных в треугольник силовых тиристоров  $VSA$ ,  $VSB$  и  $VSC$ , подключенный к кольцам ротора асинхронного электродвигателя  $M1$  и дросселя  $Др$  (рис. 16). СУ формирует сигналы управления тиристорами БТ и включа-

ет в себя источник питания (ИП), блоки задания напряжений (БЗН), интегрирования (БИ), понижающие трансформаторы, по 3 блока (пофазно) выделения положительной полуволны напряжения (ВП), формирования пилообразных напряжений (ФПН), формирования управляющего импульса (ФУИ). При этом работа устройства происходит только при наличии питания статорной цепи электродвигателя.

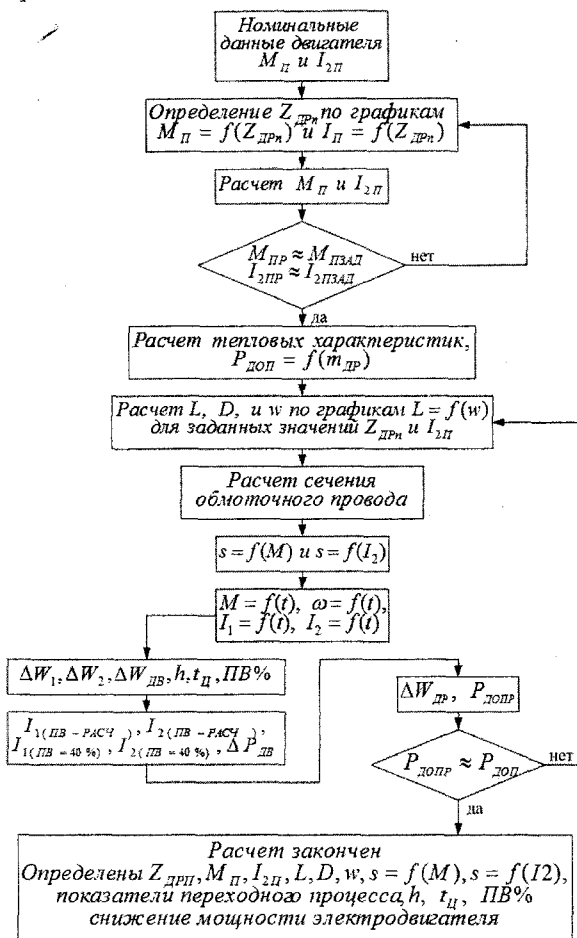


Рис. 15. Алгоритм расчета параметров дросселя

Идея работы устройства заключается в следующем. При подаче питания на статорную цепь происходит пуск электродвигателя с дросселем в роторной цепи. Тиристоры при этом заперты и на пуск электродвигателя с дросселем не оказывают никакого влияния. По мере разгона двигателя напряжение на кольцах ротора падает и при достижении заданного уровня (порогового напряжения  $U_{ПОР}$ ) вступает в работу РСТ05-В, СУ которого формирует угол открытия тиристоров близкий к  $180^\circ$ . Затем угол открытия тиристоров плавно уменьшается до  $0^\circ$ , замыкая кольца ротора. Темп открытия тиристоров можно устанавливать в зависимости от требований технологического процесса.

На рис. 17 представлены механические и электромеханические характеристики ДЭП с

РСТ05-В. Механическая дроссельная характеристика 1 в рабочей зоне имеет жесткость меньше, чем на естественной механической характеристике 2 (рис. 17а). Поэтому скорость при статическом моменте  $M_{Ст}$  на дроссельной характеристике  $\omega_d$  на 10–15% ниже, чем скорость  $\omega_E$  на естественной характеристике.



же статическом моменте нагрузки  $M_{СТ}$  ток статический  $I_E$  при завершении пуска на естественной характеристике (рис. 17б) меньше, чем ток  $I_D$  на дроссельной характеристике. Это обусловлено тем, что на естественной характеристике в установившемся режиме частота тока в роторной цепи меньше, чем на дроссельной характеристике, и ток ротора становится более активным. Поэтому на естественной характеристике тот же  $M_{СТ}$  создается при меньшем значении тока ротора. Таким образом, разработанное устройство РСТ05-В не только обеспечивает работу электропривода на максимальных скоростях, чем увеличивает производительность, но и облегчает тепловой режим работы электродвигателя и уменьшает расход электроэнергии.

На рис. 18 представлены экспериментальные осциллограммы изменения тока ротора  $I_P$ , частоты вращения вала электродвигателя  $\omega$  и тока статора  $I_C$  во времени при пуске с моментом  $M_{СТ}$ , равным 0,75 от момента номинального  $M_H$ .

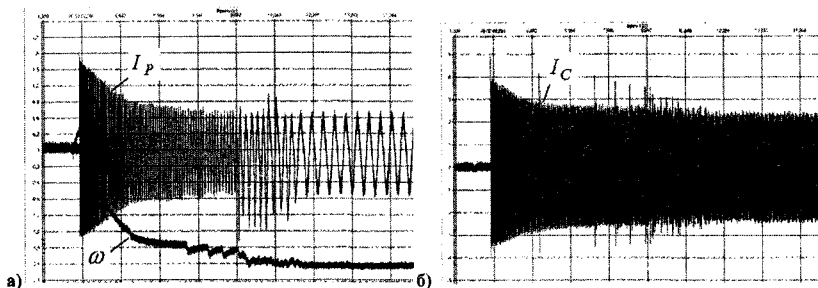


Рис. 18. Осциллограммы тока ротора  $I_P$ , тока статора  $I_C$  и частоты вращения  $\omega$

Видно, что броски токов статора и ротора электродвигателя при работе устройства практически не превышают бросков в первый момент подачи напряжения на статор электродвигателя.

Лабораторные и производственные испытания показали работоспособность разработанного устройства РСТ05-В.

На основе разработанного математического описания проводится расчет характеристик ДЭП с пускорегулирующим устройством в роторной цепи.

При расчете приняты следующие допущения:

- к входам обмоток фаз ротора приложена ЭДС ротора синусоидальной формы;

- каждый тиристор в фазах роторной цепи заменен на резистор сопротивлением  $rt$ . Это сопротивление, в зависимости от того, открыт тиристор или закрыт, принимает значение:

$rt=0,001$  Ом (тиристор открыт);

$rt=100$  кОм (тиристор закрыт).

Схема замещения с учетом допущений представлена на рис. 19.



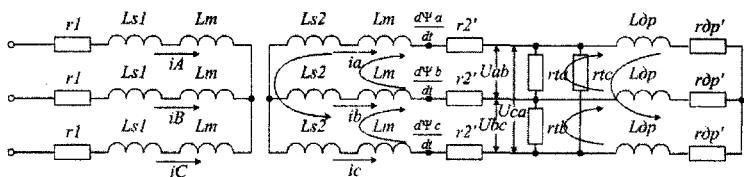


Рис. 19. Схема замещения с учетом принятых допущений

Здесь  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  – напряжения на кольцах ротора;

Для схемы записывается система уравнений для статора и ротора:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_A}{dt} = u_A - i_A \cdot r_1 \\ \frac{d\Psi_B}{dt} = u_B - i_B \cdot r_1 \\ \frac{d\Psi_C}{dt} = u_C - i_C \cdot r_1 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} = i_a \cdot r_2' + i_{ta} \cdot r_{ta} - i_b \cdot r_2', \\ \frac{d\Psi_b}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} = i_b \cdot r_2' + i_{tb} \cdot r_{tb} - i_c \cdot r_2', \\ \frac{d\Psi_c}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} = i_c \cdot r_2' + i_{tc} \cdot r_{tc} - i_a \cdot r_2', \end{array} \right. \quad (13)$$

где  $u_A, u_B, u_C$  – мгновенные значения напряжений трех фаз статора;  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C$ ,  $\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  – мгновенные значения потокосцеплений фаз статора и ротора соответственно;  $r_1 = r_A = r_B = r_C$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;  $r_2 = r_a = r_b = r_c$  – активное сопротивление фазы обмотки ротора;  $r_2' = r_2 \cdot k_e^2$  – приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора;  $r_{dp}' = r_{dp} \cdot k_e^2$  – приведенное активное сопротивление фазы дросселя;  $L_{dp}$  – приведенная индуктивность обмотки дросселя;

Решение системы дифференциальных уравнений осуществляется методом Рунге-Кутты 4 порядка:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= i_A \cdot L_1 + i_B \cdot M_{AB} + i_C \cdot M_{AC} + i_a \cdot M_{Aa} + i_b \cdot M_{Ab} + i_c \cdot M_{Ac}, \\ \Psi_B &= i_A \cdot M_{BA} + i_B \cdot L_1 + i_C \cdot M_{BC} + i_a \cdot M_{Ba} + i_b \cdot M_{Bb} + i_c \cdot M_{Bc}, \\ \Psi_C &= i_A \cdot M_{CA} + i_B \cdot M_{CB} + i_C \cdot L_1 + i_a \cdot M_{Ca} + i_b \cdot M_{Cb} + i_c \cdot M_{Cc}, \\ \Psi_a - \Psi_b &= i_A \cdot (M_{aA} - M_{bA}) + i_B \cdot (M_{aB} - M_{bB}) + i_C \cdot (M_{aC} - M_{bC}) + \\ &+ i_a \cdot (L_2 - M_{ba}) + i_b \cdot (M_{ab} - L_2) + i_c \cdot (M_{ac} - M_{bc}), \\ \Psi_b - \Psi_c &= i_A \cdot (M_{bA} - M_{cA}) + i_B \cdot (M_{bB} - M_{cB}) + i_C \cdot (M_{bC} - M_{cC}) + \\ &+ i_a \cdot (M_{ba} - M_{ca}) + i_b \cdot (L_2 - M_{cb}) + i_c \cdot (M_{bc} - L_2), \\ \Psi_c - \Psi_a &= i_A \cdot (M_{cA} - M_{aA}) + i_B \cdot (M_{cB} - M_{aB}) + i_C \cdot (M_{cC} - M_{aC}) + \\ &+ i_a \cdot (M_{ca} - L_2) + i_b \cdot (M_{cb} - M_{ab}) + i_c \cdot (L_2 - M_{ac}). \end{aligned} \quad (14)$$

Токи, протекающие через тиристоры, находятся по законам Кирхгофа:

$$\begin{aligned} i_{ta} &= i_a - i_{da} + i_{tc}, \\ i_{tb} &= i_b - i_{db} + i_{ta}, \\ i_{tc} &= i_c - i_{dc} + i_{tb}, \\ i_{ta} \cdot r_{ta} + i_{tb} \cdot r_{tb} + i_{tc} \cdot r_{tc} &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

где  $M_{AB} = M_{AC} = M_{BA} = M_{BC} = M_{CA} = M_{CB} = M_1$  – взаимные индуктивности между любыми двумя обмотками статора;  $M_{ab} = M_{ac} = M_{ba} = M_{bc} = M_{ca} = M_{cb} = M_2$  – взаимные индуктивности между любыми двумя обмотками ротора;  $M_{Aa}, M_{Ab}, M_{Ac}, M_{Ba}, M_{Bb},$

$M_{Bc}, M_{Ca}, M_{Cb}, M_{Cc}$  – взаимные индуктивности между соответствующими фазами статора и ротора;  $M_{aA}, M_{aB}, M_{aC}, M_{bA}, M_{bB}, M_{bC}, M_{cA}, M_{cB}, M_{cC}$  – взаимные индуктивности между соответствующими фазами ротора и статора;  $L_1, L_2$  – индуктивности обмоток статора и ротора соответственно.

Для решения уравнений систем (13)–(15) используется метод Крамера. Определяются токи  $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$  и токи, протекающие через тиристоры  $i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$ .

Напряжения на кольцах ротора определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{rab} &= \frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} - i_a \cdot r_2' + i_b \cdot r_2', \\ U_{rbc} &= \frac{d\Psi_b}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} - i_b \cdot r_2' + i_c \cdot r_2', \\ U_{rca} &= \frac{d\Psi_c}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} - i_c \cdot r_2' + i_a \cdot r_2'. \end{aligned} \quad (16)$$

Напряжение управления каждого из тиристоров будет формируется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_{Ya} \approx U_{ПИТ} \\ U_{Yb} \approx U_{ПИТ} \\ U_{Yc} \approx U_{ПИТ} \end{bmatrix}, \text{ если } \begin{bmatrix} U_{Ia} + U_{Ia} \geq U_{ЗАП} \\ U_{Ib} + U_{Ib} \geq U_{ЗАП} \\ U_{Ic} + U_{Ic} \geq U_{ЗАП} \end{bmatrix} \quad (17)$$

где  $U_{ПИТ}$  – напряжение питания,  $U_{II}$  – пилообразное напряжение,  $U_{И}$  – напряжение на выходе интегратора,  $U_{ЗАП}$  – напряжение запираения.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется по формуле

$$M = \frac{2 \cdot p \cdot ((\Psi_C - \Psi_B) \cdot i_A + (\Psi_A - \Psi_C) \cdot i_B + (\Psi_B - \Psi_A) \cdot i_C)}{3 \cdot \sqrt{3}} \quad (18)$$

Экспериментальные и расчетные кривые переходного процесса выхода ДЭП с двигателем МТФ 111-6 мощностью 3,5 кВт на характеристику, близкую к естественной, представлены на рис. 20.

Оценивая полученные результаты, необходимо отметить, что разработанная модель достаточно точно отражает процессы, происходящие в ДЭП с пускорегулирующим устройством в роторной цепи. Модель можно рекомендовать для расчетов как нерегулируемого, так и ДЭП с РСТ-05В.

По итогам работы разработано и внедрено в мелкосерийное производство пускорегулирующее устройство РСТ05-В. Получен патент на полезную модель. Получен диплом победителя первого тура конкурса инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и ресурсосбережение» (г. Томск, 2006 г.)

В настоящее время система управления данного устройства успешно реализована на микроконтроллере фирмы ATMEL.

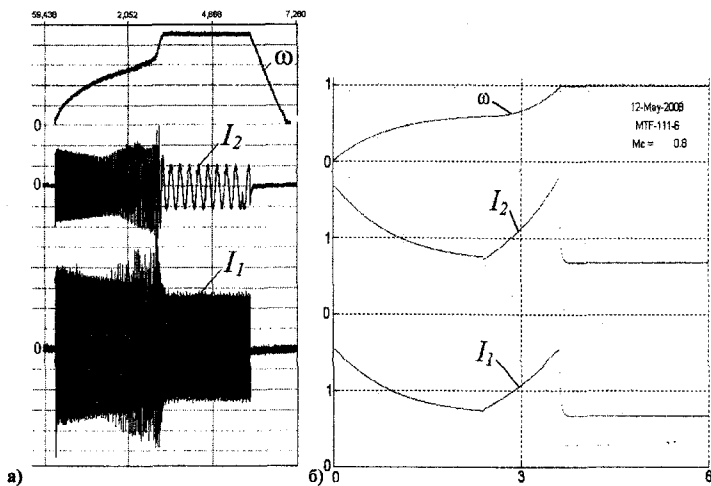


Рис. 20. Экспериментальные а) и расчетные б) зависимости переходных процессов дроссельного электропривода совместно с РСТ05-В

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная задача улучшения энергетических и массогабаритных показателей ДЭП и повышения его производительности.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель ДЭП с регулятором РСТ05-В в роторной цепи, на основе которой предложена методика расчета характеристик рассматриваемого привода. На основе экспериментальных исследований показана адекватность разработанной модели и методики расчета реальным процессам, протекающим в ДЭП с регулятором РСТ05-В. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований показало, что предложенная методика позволяет рассчитывать статические и динамические режимы работы такого электропривода с погрешностью 5–10%.

2. На основе рассмотрения физических основ работы ДЭП и проведенных экспериментальных исследований определены основные аналитические соотношения для расчета электромагнитных и конструктивных параметров дросселя для промышленных электроприводов мощностью 5–120 кВт. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что полученное математическое выражение позволяет рассчитывать сопротивление дросселя при различных значениях амплитуды и частоты тока, протекающего по его обмотке, с погрешностью 5–10%.

3. На основе двухмассовой модели тепловых процессов разработана математическая модель тепловых процессов, протекающих в дросселе, на основе которой в пакете MatLab 6.5 + Simulink 4.5 создана компьютерная модель. Экс-

периментально доказана их адекватность реальным тепловым процессам, протекающим в дросселе при его работе в составе ДЭП. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что полученная математическая модель позволяет рассчитывать температуру элементов дросселя при различных значениях амплитуды и частоты тока, протекающего по его обмотке, с погрешностью 5–10%.

4. Разработаны методики и программы расчета тепловых и электромагнитных характеристик дросселей для работы в составе электропривода, а также проверочного расчета допустимой мощности дросселя, позволившие улучшить массогабаритные показатели ДЭП на 18–20 %. Предложенные методики позволяют определить, насколько снижается допустимая мощность электродвигателя при включении в роторную цепь дросселя. При этом результаты расчета являются основанием для ограничения нагрузок или выбора двигателя большей мощности с последующей проверкой его на нагрев.

5. По результатам проведенных исследований разработаны каталоги дросселей, серийный выпуск которых осуществляется ООО «Горнозаводское объединение», а также даны инженерные рекомендации по улучшению конструктивных и электрических параметров этих дросселей, позволяющие сократить сроки проектных работ в среднем в 1,4–1,6 раза. При выборе дросселя из предложенного каталога погрешность расчета находится в пределах 10–15%. Данный каталог рекомендуется для использования при проектировании ДЭП.

6. Предложен алгоритм работы регулятора скорости, позволяющего вывести ДЭП на механическую характеристику, близкую к естественной механической характеристике двигателя, обеспечивающий снижение потребления электроэнергии и повышение производительности за счет снижения статических токов статора и ротора и повышения статической скорости привода.

7. Разработано и внедрено в мелкосерийное производство пускорегулирующее устройство (Патент РФ № 55229, Патент РФ № 2311725), обеспечивающее повышение производительности в зависимости от режима работы электропривода на 12–15 % и снижение потребления электроэнергии на 15–20%.

#### **Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Борисов, А.М. Пусковое устройство асинхронного электродвигателя / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2005. – Вып. 6, № 9 (49). – С. 79–83.

2. Борисов, А.М. Автоматизация режимов работы механизмов подъема кранов с асинхронными электроприводами / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2006. – Вып. 7. № 10 (50). – С. 3–8.

3. Борисов, А.М. Тиристорный регулятор скорости дроссельного асинхронного электропривода с регулируемой жесткостью механической характеристики / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков //

#### Другие научные публикации по теме диссертации

4. Борисов, А.М. Лабораторный стенд «Средства автоматизации и управления» / А.М. Борисов, А.С. Нестеров, А.С. Одинцов // Электроприводы переменного тока: Труды международной 13-й научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – С. 341–344.

5. Борисов, А.М. Дроссельный асинхронный регулируемый электропривод / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, С.А. Фомин, А.Н. Шишков, А.С. Нестеров, А.А. Васькин, В.И. Ильинов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2005. – №10. – С. 14–17.

6. Борисов, А.М. Тиристорный регулятор скорости дроссельного асинхронного электропривода / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. вып. 12 / под ред. С. И. Лукьянова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2006. – С. 218–222.

7. Нестеров, А.С. Расчет параметров индуктивного реостата дроссельного асинхронного электропривода / А.С. Нестеров // Труды XI-й Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», МКЭЭЭ-2006 (ICEEE-2006), часть II. – М: ГОУ ВПО МЭИ (ТУ), 2006. – С. 39–40.

8. Нестеров, А.С. Моделирование электромагнитных процессов в индуктивном реостате при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором. Оптимизация параметров индуктивного реостата / А.С. Нестеров // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – С. 154.

9. Нестеров, А.С. Устройство выхода на естественную характеристику РСТ 05-В / А.С. Нестеров // Труды Всероссийской конференции – конкурса инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и ресурсосбережение». – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 98–104.

10. Борисов, А.М. Математическая модель асинхронного электропривода с нелинейным сопротивлением в цепи ротора / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков // Электроприводы переменного тока: Труды международной 14-й научно-технической конференции. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 189–192.

11. Нестеров, А.С. Моделирование тепловых процессов в индуктивном реостате (дросселе) в пуско-тормозных и установившихся режимах работы. Оптимизация конструктивных параметров дросселя / А.С. Нестеров // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 138.

## Патенты

12. Патент РФ № 55229, МПК<sup>7</sup> H02P 5/40, 7/62. Устройство пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков; заявл. 10.01.06; опубл. 27.07.06, бюл. № 21. – С. 6: ил. 1.

13. Патент РФ № 2300169, МПК<sup>7</sup> H02P 25/26. Способ и устройство управления асинхронным двигателем с фазным ротором / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков; заявл. 10.01.06; опубл. 27.05.07, бюл. № 15. – С. 8: ил. 3.

14. Патент РФ № 2311724, МПК<sup>7</sup> H02P 25/26. Способ управления асинхронным электродвигателем с фазным ротором / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков; заявл. 25.06.06; опубл. 27.11.2007, бюл. № 33. – С. 8: ил. 4.

15. Патент РФ № 2311725, МПК<sup>7</sup> H02P 25/26. Способ управления автоматизацией пуска-тормозных режимов дроссельного асинхронного электропривода / А.М. Борисов, Г.И. Драчев, Н.Е. Лях, А.С. Нестеров, А.Н. Шишков; заявл. 24.06.06; опубл. 27.11.2007, бюл. № 33. – С. 8: ил. 7.